

베타 및 감마線 計測用 서어베이 미터 (Beta Gamma Survey Meter)

朴 寅 用* · 李 炳 璿**

(Park, In Yong) (Lee, Byung Suhn)

要 約

G-M 計數管을 利用한 beta 와 gamma 線에 敏感한 survey meter 에 關한 研究이다. 이 裝置는 完全 transistor 化 되어 있으며 乾電池로 動作하게 되어 있고 2.5, 25 및 250 MR/HR 의 3가지의 full-scale meter range 를 直讀하게 되어 있다.

Counting-rate meter 回路를 이루고 있는 collector 結合 單安定 multivibrator 와 電源回路의 dc-dc 變換器를 이루고 있는 無安定 blocking 發振器의 解析을 하였고 設計式을 誘導하였다. G-M 計數管의 分解時間을 높이기 爲하여 0.5v 程度의 낮은 電壓으로 triggering 할 수 있게 設計하였다.

Abstract

A survey meter which is used a G-M counter sensitive to beta and gamma radiation is studied. This device is completely transistorized, operated with battery, and can be read directly the 3 full-scale meter range; 2.5, 25, and 250 MR/HR respectively.

The collector-coupled monostable multivibrator consisting of a counting-rate meter circuit, and the astable blocking oscillator consisting of a dc-dc converter for power supply are analyzed and derived the design equations. To improve the resolving time of the G-M counter the device is designed to be triggered by low pulse in the order of 0.5v.

1. 序 論

이 G-M 計數管(Geiger-Müller counter tube)을 利用한 bata(β)와 gamma(γ)線에 敏感한 survey meter 는 가볍고 携帶用이고 乾電池로 動作하는 放射線計測裝置이다. 이 裝置는 選擇 스위치로 選擇함에 따라 2.5, 25 및 250 milliröntgens per hour(MR/HR)의 3가지 full-scale meter range 를 直讀할 수 있다. MR/HR range

는 實驗室에서 Co^{60} 의 γ 線을 使用하여 矯正되었다.

G-M 計數管에 放射線이 들어 왔을 때 電子回路의 入力端에서의 pulse 의 높이는 一般的으로 1v 또는 그 以上이다. 그리하여 一般的으로 計數率計回路(counting-rate meter circuit)의 前段에는 적어도 一段程度의 pulse 增幅器와 pulse 整形回路(pulse-shaping circuit)가 必要하다. 여기서는 裝置를 最大限으로 簡單하게 하기 위하여 pulse 增幅器를 使用하지 않고 計數率計回路를 0.5v 程度의 낮은 pulse 로 trigger 하여 計數할 수 있도록 設計하였다. 그러면 G-M 計數管에 있어서 普通

*, ** 原子力研究所 電子工學研究室, 正會員 Electronics Division, Atomic Energy Research Institute
接受日字: 1971年 3月 8日

100~200 μ sec 의 不感時間(dead time) 다음에 나타나는 200~300 μ sec 의 回復時間(recovery time)사이 에 들어 오는 放射線에 依하여 자라나는 낮은 pulse 도 計數할 수 있게 되어 G-M 計數管의 分解時間(resolving time)이 向上된다.

G-M 計數管은 β 線 遮蔽 window 가 있어서 γ 線만을 檢出할 때에는 이 window 를 닫고서 測定한다. 이 window 는 β 線의 에너지가 約 1 mega-electron volt (MeV)까지를 遮蔽한다. β 線이나 β 線과 γ 線을 같이 測定할 때에는 window 를 열고서 測定한다. 電源電池는 電壓이 1.5v 인 乾電池 BA30 3個를 使用하여 直流-直流變換器(dc-dc converter)를 構成하여 必要한 低電壓과 高電壓을 얻고 있다. 所要電流는 12.5mA 로 大端히 적다. case 에는 probe 를 附着시킬 수 있게 하였고 測방을 낄수 있게 하여 携帶에 便利하도록 하였다.

이 survey meter 는 一般의인 放射線計測에는 勿論 放射線物質의 探鑛에도 利用할수 있다.

2. 全體의인 回路動作

全體의인 survey meter 의 構成圖를 그림 1 에 表示한다. G-M 計數管과 回路는 β 또는 γ 線이 G-M 計數管에 들어가면 하나의 負의 電壓 pulse 를 發生한다. 이 負의 pulse 는 monostable multivibrator 를 trigger 시킨다. 入力 pulse 가 없을때인 安定狀態에서 cutoff 인 transistor 의 collector 에 連結된 Meter 에는 multivibrator 가 trigger 될 때마다 電流가 흐르게 된다. Meter 回路에 連結된 하나의 平滑 capacitor 는 이 電流를 平均해서 meter 의 指示가 入力 pulse 의 平均計數率에

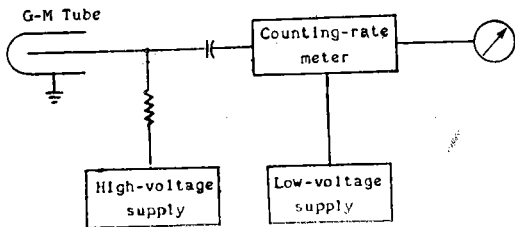


그림 1. Survey meter 의 構成圖

Fig. 1. Block diagram of a survey meter.

比例하게 된다. Meter 의 눈금은 MR/HR 로 矯正되었다.

3. G-M 計數管과 入力回路

G-M 計數管과 入力回路를 그림 2에 表示한다. G-M 計數管이 Geiger 領域에서 動作할 때 放射線이 G-M 計數管內의 gas 를 ion 化하여 放電할 때마다 두 端子사이 에 電荷를 發生한다. 그리하여 G-M 計數管의 中心線의 電位를 瞬間的으로 降下시켜 分布容量 Cd 를 部分的으로 放電시킨다. 그리고 Cd 는 G-M 計數管의 負荷抵抗 R₁₃ 및 R₁ 의 並列抵抗과 Cd 의 積으로 되는 時定數 Cd (R₁₃//R₁)로 R₁₃을 通하여 初期電荷로 再充電된다. 이리하여 R₁₃의 兩端에는 負의 pulse 가 形成된다. Coupling capacitor 이며 高電壓 blocking capacitor 인 C₁의 容量은 Cd 보다 大端히 크므로, 入力 pulse 에 對하여는 短絡이 된다. 이 pulse 는 C₁을 通하여 monostable multivibrator 의 transistor Q₁의 collector 로 傳達된다.

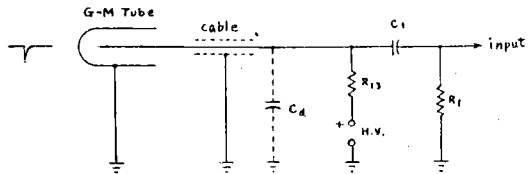


그림 2. 入力 回路
Fig. 2. Input circuit

4. 計數率計 回路

計數率計의 基本回路는 그림 3에 表示한 collector 結合 單安定 multivibrator (collector-coupled monostable multivibrator)이다. Q₂는 그 base 가 R를 通하여 Vcc 에 連結되어 있으므로 入力 trigger pulse 가 들어 오기 前의 安定狀態(Stable state)에서 on 이고 Q₁은 off 이다. 負의 入力 trigger pulse 가 들어 오면 diode D1은 forward bias 되어 入力 pulse 가 Q₁의 collector 에 傳達된다. 그리하여 Q₁은 on 이 되고 Q₂는 off 가 되어 準安定狀態(quasi-stable state)가 된다. Q₁이 on 인 동안에는 D1은 reverse bias 되고 Q₁

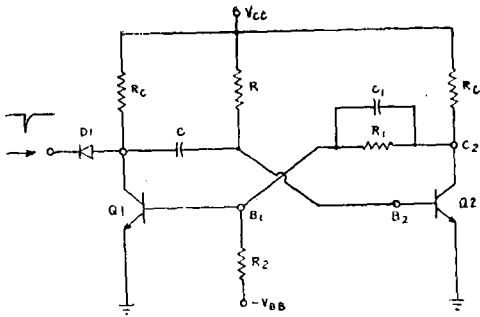


그림 3. Collector 結合 單安定 multivibrator
Fig. 3. Collector-coupled monostable multivibrator.

collector 를 入力回路에서 孤立시킨다. C의 電荷가 放電함에 따라 이 큰 負의 電壓은 指數的으로 上昇하여 OV 를 지나 cutin 電壓 V_{γ} 가 되면 Q2 는 다시 on 으로 되고 Q1 은 off 로 되어 安定狀態로 回復한다. 그림 4(a)에 表示하는 바와같이 安定狀態에서 Q2 는 on 이고 그 base 電壓은 base-to-emitter saturation 電壓 V_{σ} 이다. 한편 Q1 은 off 이고 그 collector 電壓은 $V_{cc} - I_{co}R_c \approx V_{cc}$ 이고 capacitor C의 兩端의 電壓은 $V_{cc} - V_{\sigma}$ 이다. 入力 trigger pulse가 들어오는 瞬間에 Q1 은 on

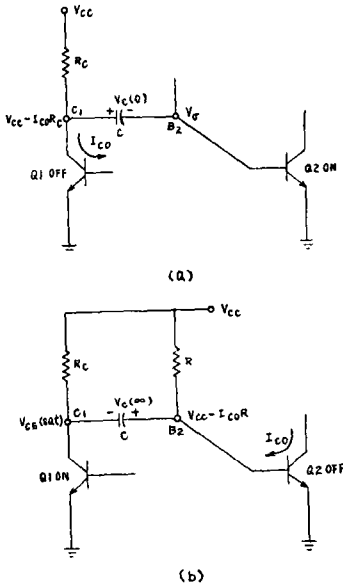


그림 4. Q1 및 Q2의 두 狀態
(a) 安定狀態, (b) $t = \infty$ 때

Fig. 4. Two states of Q1 and Q2
(a) in the stable state; (b) at the time $t = \infty$

이 되고 그 collector 電壓은 collector-to-emitter saturation 電壓 $V_{CE(sat)}$ 로 떨어진다. Capacitor 兩端의 電壓은 瞬間的으로 變할 수 없으므로 Q2의 base 電壓 v_{B2} 도 $V_{cc} - V_{CE(sat)} - V_{\sigma}$ 로 떨어진다. 따라서

$$v_{B2}(0+) = -(V_{cc} - V_{CE(sat)} - V_{\sigma}) \quad (1)$$

그림 4(b)에 표시하는 바와 같이

$t = \infty$ 에서 Q2의 base 電壓은

$$v_{B2}(\infty) = V_{cc} - I_{co}R \quad (2)$$

準安定狀態期間中の B_2 點의 電壓 v_{B2} 의 變化하는 모양을 그림 5에 表示한다.

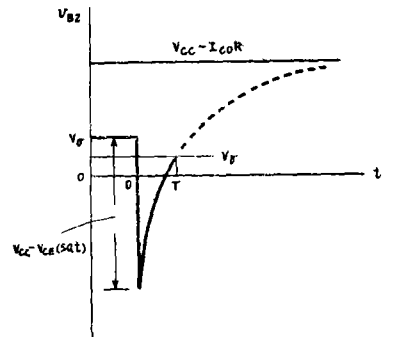


그림 5. 準安定狀態期間中の B_2 點의 電壓 v_{B2} 의 變化
Fig. 5. Voltage variation at B_2 during the quasi-stable state.

따라서 B_2 點의 電壓의 時間에 對한 變化 v_{B2} 는

$$v_{B2}(t) = v_{B2}(\infty) + [v_{B2}(0+) - v_{B2}(\infty)]e^{-t/\tau} \quad (3)$$

여기에 $\tau = (R + R_o)C \approx RC$ 이다. R_o 는 準安定狀態에서 on 되어 있는 Q1의 出力抵抗이다. C가 R와 on 되어 있는 Q1을 通하여 放電함에 따라 Q2의 reverse base 電壓은 적어져서 어떤 時間後에는 OV가 되고 이어서 正으로 되며 cutin 電壓인 V_{γ} 가 되면 Q2는 時間 T에서 다시 on이 된다. 그리하여 (3)에서 $t = T$ 로 놓으면

$$T = \tau \ln \frac{v_{B2}(\infty) - v_{B2}(0+)}{v_{B2}(\infty) - v_{B2}(T)} \quad (4)$$

$$= RC \ln \frac{2V_{cc} - I_{co}R - V_{CE(sat)} - V_{\sigma}}{V_{cc} - I_{co}R - V_{\gamma}} \quad (5)$$

여기서 V_{γ} 를 無視하면

$$T = RC \ln \left(1 + \frac{V_{cc} - V_{CE(sat)} - V_{\sigma}}{V_{cc} - I_{co}R} \right) \quad (6)$$

常溫에서 I_{CO} 를 無視하고 $V_{CC} \gg V_{CE(sat)} + V\sigma$ 이므로

$$T \approx 0.69RC \tag{7}$$

또한

$$C = \frac{T}{R} \frac{1}{\ln\left(1 + \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)} - V\sigma}{V_{CC} - I_{CO}R}\right)} \tag{8}$$

또는 $C \approx \frac{T}{0.69R}$ (9)

回路가 安定狀態로 되자마자 C는 充電을 始作한다. 充電은 $t=T+$ 때의 等價回路인 그림 6에서와 같이 R_c 와 base spreading 抵抗 $r_{bb'}$ 를 통하여 함으로 時定數 τ_1 은

$$\tau_1 = (R_c + r_{bb'})C \approx R_c C \tag{10}$$

I_{CO} 의 效果를 無視하면 Q1의 collector 電壓이 0.9 V_{CC} 로 되는 時間 t_1 은

$$t_1 = 2.3R_c C \tag{11}$$

이 回復時間後에 비로소 또 다른 trigger pulse 를 印加할 수 있다. 그림 6에서

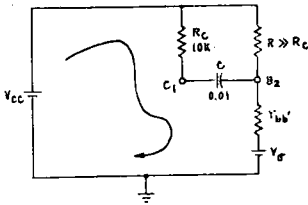


그림 6. $t=T+$ 때의 C의 充電通路를 表示하는 等價回路
Fig. 6. Equivalent circuit showing the charging path of C at $t=T+$

$$t_1 = (2.3)(10 \times 10^3)(0.01 \times 10^{-6}) = 23 \mu \text{ sec}$$

여기에 C는 3개의 timing capacitor 中 中間 것을 擇하였다. 그런데 G-M 計數管의 分解時間 (resolving time)은 普通 數百 $\mu \text{ sec}$ 이므로 C가 充電을 完了한 아주 後에 또 다른 pulse가 들어온다는 것을 알 수 있다. 이것은 C가 充電을 完了하기 前에 commutating capacitor C_1 이 充電을 完了한다는 假定下에서 適用되는 것이다. 回路가 安定狀態로 된 後에 C_1 은 그림 7에 表示한 充電回路를 통하여 時定數 τ_2 로 充電한다. 여기에 R_0

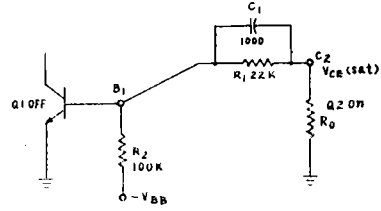


그림 7. C_1 의 充電通路를 表示하는 等價回路
Fig. 7. Equivalent circuit showing the charging path of C_1 .

는 on 되어 있는 Q2의 出力抵抗이다. $R_0 \ll R_2$ 이므로

$$\tau_2 = C_1 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{12}$$

그리고 Q1의 base의 reverse base 電壓은 undershoot를 거쳐서 安定值가 된 後에 비로소 入力 trigger pulse의 影響을 받게 된다. 이 安定值 V_F 는 그림 7에서 重疊의 理를 適用하여

$$v_{B1} = -\frac{V_{BB}R_1}{R_1 + R_2} + \frac{V_{CE(sat)}R_2}{R_1 + R_2} = V_F \tag{13}$$

$R_1 = 22K, R_2 = 100K, -V_{BB} = -12V$ 및 $V_{CE(sat)} = 0.3V$ 면

$$V_F = -\frac{(12)(22)}{22+100} + \frac{(0.3)(100)}{22+100} = -1.9V$$

結果的으로 $\tau_1 > \tau_2$ 가 되어야 할 것이며 C_1 도 이 條件을 滿足하도록 決定한다. 그림 6과 7에서 $R_c = 10K, C = 0.01 \mu F$ 및 $C_1 = 1000pF$ 이므로 (10)과 (12)에 依하여

$$\tau_1 = (10 \times 10^3)(0.01 \times 10^{-6}) = 100 \mu \text{ sec}$$

$$\tau_2 = (1000 \times 10^{-12}) \frac{(22)(100)(10^3)}{22+100}$$

$$= 18 \mu \text{ sec}$$

따라서 $\tau_1 > \tau_2$ 를 滿足한다.

簡略하게 그린 計數率計 回路를 그림 8에 表示한다. Q1이 on이 되어 collector 電壓이 낮아지면 C_2 는 充電을 한다. pulse와 pulse 사이에는 C_2 는 R_6 과 meter의 内部抵抗 R_m 의 並列抵抗과 R_2 를 통하여 放電을 한다. 時定數는 $C_2(R_2 + R_6 // R_m)$ 로 表示된다. 萬一 이 時定數가 pulse間 隔보다 길면 meter는 pulse의 反復率의 平均을 指示할 것이다.

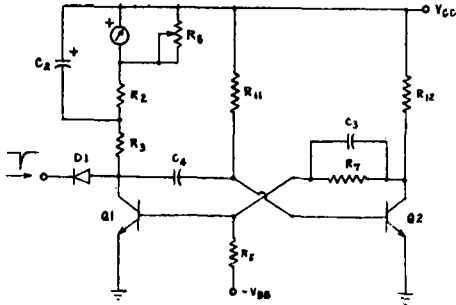


그림 8. 簡略하게 그린 計數率計回路.

Fig. 8. Simplified circuit of the counting-rate meter.

5. 電源回路

計數率計에 必要한 直流低電壓과 G-M 計數管에 必要한 直流高電壓의 두 가지 電壓을 얻기 위하여 그림 9에 表示하는 無安定 blocking 發振器 (astable blocking oscillator)로 發振시켜 昇壓하고 整流시켜서 必要한 直流電壓을 얻었다. Blocking 發振器를 動作시키기 위한 電源은 乾電池 BA 30 3個를 使用하여 4.5V 로 하였다.

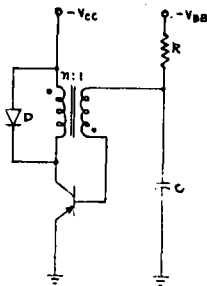


그림 9. 無安定 blocking 發振器

Fig. 9. An astable blocking oscillator.

Pulse 間隔 T_b 사이에 即 transistor 가 on 인 동안에 capacitor C는 그림 10에 表示하는 바와같이 正의 方向으로 即 transistor 가 off 되는 方向으로 充電된다. 正饋作用으로 transistor 는 急速히 off 가 된다. Transistor 가 完全히 cut off 가 되면 C는 R를 通하여 時定數 RC로 放電되고 base 電壓도 낮아져서 OV가 되고 이어서 Cutin 電壓인 $-V_\gamma$ 가 되면 또 다른 pulse 를 發生한다.

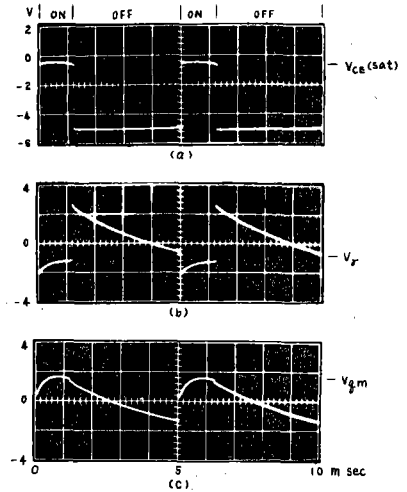


그림 10. 그림 9의 無安定 blocking 發振器의 波形 (a) collector; (b) base; (c) capacitor

Fig. 10. Waveforms of astable blocking oscillator of Fig. 9 (a) collector; (b) base; (c) capacitor.

Transistor 가 on 이 되는 瞬間에 pulse 變壓器 2次電壓은 미처 $-\frac{V_{cc}}{n}$ 로 成長하지 못 한다. 여기서 $n = \frac{N_1}{N_2}$ 이다. 그리하여 base는 純全히 C의 電壓에 依存한다. Peak negative base 電壓 V_{bm} 과 이 때에 흐르는 peak base 電流 I_{bm} 은 各

$$V_{bm} = -\frac{V_{cc}}{n} \tag{14}$$

$$I_{bm} = \frac{V_{cc}}{n\gamma_{bb'}} \tag{15}$$

여기에 $\gamma_{bb'}$ 는 transistor 의 base spreading 抵抗이다. 計算目的으로 이 電流는 全 pulse 間隔사이에 一定하다고 假定한다. I_{bm} 은 C를 通하여 흐르므로 電壓變化는

$$\Delta V = \frac{1}{C} I_{bm} \Delta t \tag{16}$$

여기에 Δt 는 pulse 間隔 T_b 이다. 그리하여 C는 $\Delta V = V_{gm}$

로 充電된다.

全 pulse 間隔에 걸쳐서 一定한 base 電流를 維持하기 爲하여는 capacitor 電壓의 變化는 pulse 變壓器 2次電壓에 比하여 적어야 할 것이다. 即

$$V_{qm} \ll \frac{V_{cc}}{n} \quad (18)$$

(15), (16), (17) 및 (18)에 의하여 制限條件은

$$C \gg \frac{dt}{\gamma_{bb'}} \quad (19)$$

Cutoff 사이에 C는 V_{qm} 에서 $-V_{BB}$ 방향으로 時定數 RC로 放電한다. 그리고 base 電壓은 V_{qm} 에서 OV로 減少한다. 따라서 base 電壓 $v_b(t)$ 는

$$v_b(t) = -V_{bb} + (V_{qm} + V_{BB}) e^{-t/RC} \quad (20)$$

로 表示되며

$$t = RC \ln \frac{V_{qm} + V_{BB}}{v_b(t) + V_{BB}} \quad (21)$$

그리하여 pulse 사이의 間隔 T 即 off 時間은

$$T = RC \ln \frac{V_{qm} + V_{BB}}{V_{BB}} \quad (21)$$

C의 電壓變化가 pulse 變壓器의 2次 電壓變化와 같다고 하면

$$V_{qm} = \frac{V_{cc}}{n} \quad (23)$$

(23)을 (22)에 代入하면

$$T = RC \ln \left(1 + \frac{V_{cc}}{nV_{BB}} \right) \quad (24)$$

여기서 使用한 回路와 같이 $n=1$ 이고 $V_{BB} = V_{cc}$ 면

$$T = 0.69 RC \quad (25)$$

Transistor가 cutoff인 사이의 間隔 T를 조금 더 詳細히 解析하면 다음과 같다. Transistor가 off가 되는 瞬間인 $t=0$ 때에 C는 V_{qm} 로 充電되어 있다고 假定하면 $v_b(t)$ 의 初期值 $v_b(O+)$ 는

$$V_b(O+) = V_{qm} \quad (26)$$

이고 그림 11에 依하여

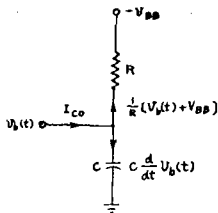


그림 11. Transistor가 off 때의 RC 回路의 電流方向
Fig. 11. Current directions of the RC circuit when the transistor is off.

$$-I_{co} + \frac{1}{R} [v_b(t) + V_{BB}] + C \frac{d}{dt} v_b(t) = 0 \quad (27)$$

여기서 I_{co} 는 transistor의 collector cutoff 電流이다. (27)의 Laplace transform을 하면

$$\frac{1}{S} (-V_{BB} - I_{co}R) + V_b(s) (1 + RCS)$$

$$-RCv_b(O+) = 0$$

$$V_b(s) = \frac{V_{qm}}{S + \frac{1}{RC}} - \frac{V_{BB} - I_{co}R}{S(1 + RCS)}$$

$$= \frac{V_{qm} + V_{BB} - I_{co}R}{S + \frac{1}{RC}} - \frac{V_{BB} - I_{co}R}{S} \quad (28)$$

Inverse Laplace transform을 하면

$$v_b(t) = (V_{qm} + V_{BB} - I_{co}R) e^{-t/RC}$$

$$- (V_{BB} - I_{co}R) \quad (29)$$

$$t = RC \ln \frac{V_{qm} + V_{BB} - I_{co}R}{v_b(t) + V_{BB} - I_{co}R} \quad (30)$$

여기서 I_{co} 를 無視하면 (21)과 一致한다. 그림 9에서 transistor가 saturation에서 cutoff로 되는 瞬間에 diode D가 없으면 變壓器의 collector 捲線에 誘起되는 逆起電力때문에 供給電壓 $-V_{cc}$ 보다도 더 負로 되어 이 電壓이 collector의 reverse collector 破壞電壓보다 크면 transistor는 破壞될 念慮가 있다. 또한 이 電壓은 變壓器의 base 捲線에도 誘起되어 emitter-base 接合도 破壞될 念慮가 있다.

그렇지 않더라도 過度한 ringing이 생기어 出力波形을 좋지 않게 하기도 한다. 그러나 變壓器의 collector 捲線에 limiting diode를 달음으로써 collector cutoff 電壓을 $-V_{cc}$ 로 制限하고 ringing도 防止할 수 있다.

完全한 電源回路를 그림 12에 表示한다. 低電壓은 無安定 blocking 發振器의 出力을 C_{14} , D_6 , D_7 및 C_{13} 으로 되는 倍壓回路 倍壓하여 R_{11} 과 C_{12} 로 되는 filter 回路로 더 平滑하게 하였고 高電壓은 無安定 blocking 發振器의 出力을 C_{10} , C_{11} , D_2 , D_3 , D_4 , D_5 , C_8 및 C_9 로 되는 4倍壓 回路로 4倍壓하여 電壓安定管으로 安定化하였고 다시 R_8 과 C_7 로 되는 filter 回路로 더 平滑하게 하였다. 이 電壓은 R_{17} 을 調整함으로써 調整할 수도 있다. 勿論 에 때에는 電壓安定管도 이 電壓에 맞는 것을 使用해야 할 것이다. 低電壓은 計數率計에 使

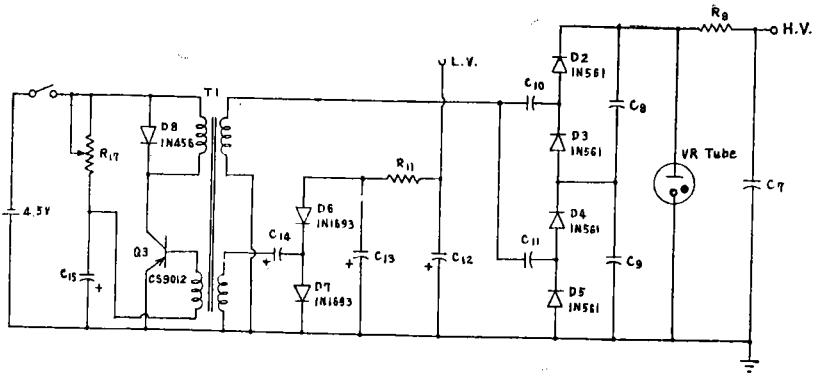


그림 12. 電源 回路
Fig. 12. power supply.

用하는 transistor 에 따라 決定되며 10V 程度이고 高電壓은 使用하는 G-M 計數管에 必要한 電壓에 따라 決定되며 700V 또는 900V 程度이다. 電源電池의 電壓이 3V 以下로 떨어져 則 電壓安定管에 흐르는 電流가 그 最下電流인 10 μ A 以下가 되어 電壓安定管이 더 이상 作用하지 않게 된다. 따라서 乾電池의 電壓이 3V 로 떨어져 則 乾電池의 壽命은 다된 것이다.

6. 全體回路的 構成

入力回路와 計數率計回路 및 電源回路를 綜合하여 全體回路를 構成한 survey meter 回路를 그림 13에 表示한다. 그리고 製作完成한 survey meter 의 寫眞을 그림 14와 15에 表示한다.

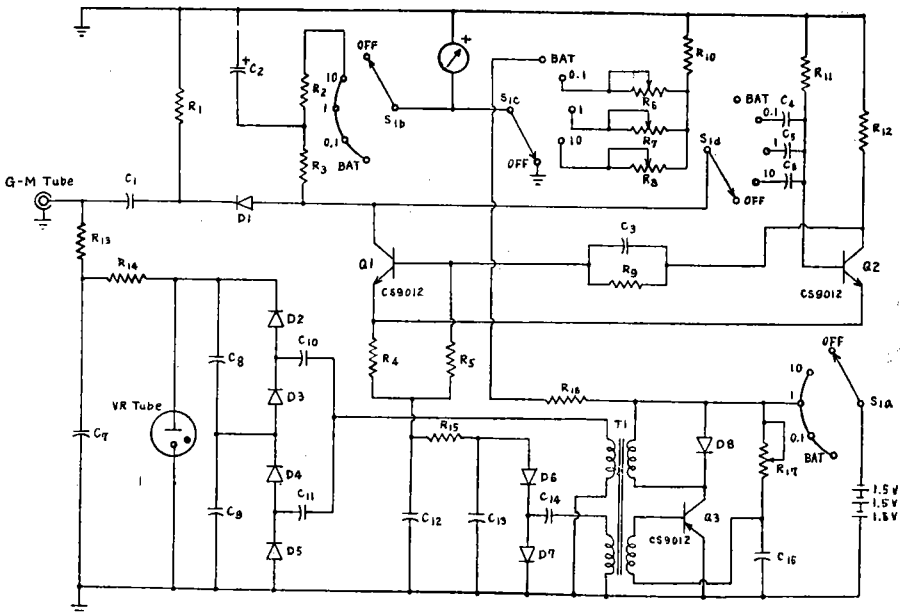


그림 13. Survey meter 回路
Fig 13. Survey meter circuit.

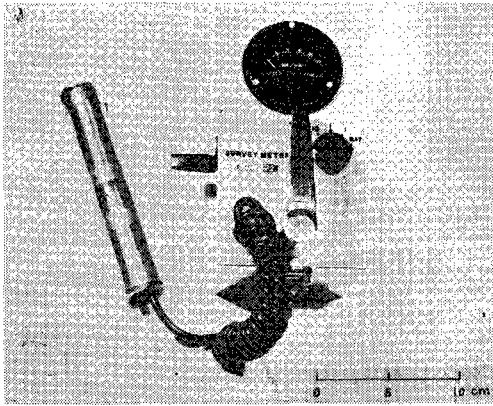


그림 14. 開發된 survey meter
Fig. 14. Survey Meter.

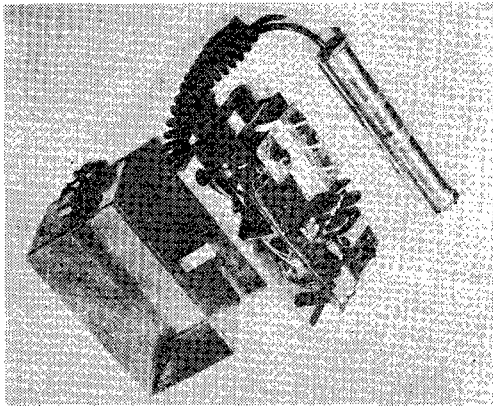


그림 15. 開發된 survey meter 의 內部.
Fig. 15. Inside view of survey meter.

7. 結 論

이 G-M 計數管을 利用한 survey meter 는 完全 transistor 化되어 簡便하고 가벼우며 安定하게 動作시킬 수 있다. 放射線量의 計測은 0에서 2.5, 0에서 25, 0에서 250 MR/HR 까지 3個 領域에 결

쳐서 測定할 수 있다. 所要電流는 12.5mA 로 大端히 낮아서 小型의 乾電池로도 200時間 以上 繼續 動作시킬 수 있다.

이 survey meter 는 一般的인 放射線計測에는 勿論 放射線物質의 探鑿에도 利用할 수 있다.

參 考 文 獻

1. W.J. Price, Nuclear Radiation Detection, 2nd edition, McGraw-Hill, 1964.
2. J. Millman, and H. Taub; Pulse, Digital and Switching Waveforms, McGraw-Hill, 1965.
3. M.V. Joyce, and K.K. Clarke, Transistor Circuit Analysis, Addison-Welsey, 1961.
4. D.J. Hamilton, A Transistor Pulse Generator for Digital Systems, IRE Transactions on Electronic Computers, EC-7, no. 3, pp. 244-249, September, 1958.
5. J. J. Rolfe, Designing a Common-emitter Blocking Oscillator, Electronic Industries, vol. 20, no. 7, pp. 110-114, July, 1961.
6. P. Norman, and E. J. E. Smith, The Design of Transistor Blocking Oscillators, Proc. IEE(London), pt. B, vol. 106, no. 18, pp. 1251-1259, May, 1959.
7. J. G. Linvill, and R. H. Mattson, Junction Transistor Blocking Oscillator, Proc. IRE, vol. 43, no. 11, pp. 1632-1639, November, 1955.
8. J. A. Narud, and M. R. Aaron, Analysis and Design of a Transistor Blocking Oscillator Including Inherent Nonlinearities, Bell System Tech. J., vol. 38, no. 3, pp. 785-852, 1959.